第 38 卷第 3 期
2018 年 2 月

生　态　学　报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.38,No.3
Feb.,2018

DOI: 10.5846/stxb201612082529
刘洋,吕俊平,刘琪,谢树莲,冯佳.太原汾河蓄水区浮游植物细胞密度及其与营养元素的关系.生态学报,2018,38(3):991-1002.
Liu Y, Lü J P, Liu Q, Xie S L, Feng J.Relationship between the growth of phytoplankton and the distribution of nutrients in the Fenhe water storage area of Taiyuan.Acta Ecologica Sinica,2018,38(3):991-1002.

太原汾河蓄水区浮游植物细胞密度及其与营养元素的关系

刘　洋,吕俊平,刘　琪,谢树莲,冯　佳*
山西大学生命科学学院, 太原　030006

摘要: 水体营养元素是影响水体生态系统的重要因素,决定着水体中不同的浮游生物群落结构,也是评价水质和水体营养状态的重要指标。对太原汾河蓄水区 9 个样点浮游植物和各项水环境及营养元素进行了调查与分析,调查期间发现(1)该流域蓝藻和绿藻为主要优势类群,即构成了以蓝-绿藻门为主要的浮游群落。平水期与丰水期优势种均以蓝藻门的微小色球藻(*Chroococcus minutus*)、微小平裂藻(*Merismopedia tenuissima*)、小颤藻(*Oscillatoria tenuis*)、铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)为主,其丰度分别占平水期和丰水期藻细胞总数的 42.95%和 59.24%。叶绿素 a 含量随地理位置变化明显,中下游显著高于上游。(2)太原汾河蓄水区水质均达到富营养状态。由于太原汾河蓄水区沿途的生活垃圾、污水的不合理排放,导致汾河中总氮、总磷等指标偏高,最终导致整个水体处于轻度富营养状态或中度富营养状态。(3)叶绿素 a 含量与水温、总氮、总磷呈显著正相关,与有机物含量呈极显著正相关,总磷的影响最为明显,说明磷可能是该地区浮游植物生长的限制因子。

关键词: 太原汾河蓄水区;浮游植物;营养元素;相关性分析;主成分分析

Relationship between the growth of phytoplankton and the distribution of nutrients in the Fenhe water storage area of Taiyuan

LIU Yang, LÜ Junping, LIU Qi, XIE Shulian, FENG Jia*
School of Life Science, Shanxi University, Taiyuan 030006, *China*

Abstract: Physicochemical factors and nutrients are important factors affecting aquatic ecosystems. Differences in physicochemical and nutrimental factors determine variation in phytoplankton community structure. Therefore, evaluation of water quality and nutrient status is necessary. Since 2015, we have studied the phytoplankton, and the physicochemical and nutrimental factors of the Fenhe water storage area. The results showed that (1) Cyanophyta and Chorophyta constituted the majority of the plankton community in the regions studied. Throughout the year, Cyanophyta was the most abundant phylum of planktonic algae. The dominant species, including *Chroococcus minutus*, *Merismopedia tenuissima*, *Oscillatoria tenuis*, and *Microcystis aeruginosa*, all of accounted for 42.95% and 59.24% of the algal community during the wet season and the dry season, respectively. Simultaneously, the concentration of chlorophyll-a revealed strong temporal and spatial variation in the Fenhe water storage area of Taiyuan, (annual mean: 38.13mg/L; range: 17.04—84.60mg/L). The chlorophyll-a concentration during the wet season was significantly higher than that in the dry season. During the wet season and the dry season, the spatial distribution patterns of chlorophyll-a were similar, increasing from upstream to downstream. (2) The water quality indicated eutrophication in the studied area. With rapid socio-economic development, increase in population and industrial enterprises, and urban-scale expansion, multiple test sites near the city center revealed that high levels of

基金项目: 山西省社会发展科技攻关项目(201603D321001, 201603D321008)
收稿日期: 2016-12-08;　　**网络出版日期:** 2017-10-18

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: fengj@ sxu.edu.cn

household-generated garbage, sewage, and industrial waste discharge into the Fenhe water storage area, owing to the lack of strict control measures. Total phosphorus and the other indicators were on the higher side, indicating that the water body is in mild or moderate eutrophic state (Chaicun Bridge, Shengli Bridge, Yingze Bridge, and Changfeng Bridge areas). In addition, at one point, some sites reached a severe eutrophic state (Nanneihuan Bridge, Jifen Bridge, Nanzhonghuan Bridge, and Jiuyuanshahe Bridge), which resulted the destruction of the ecological environment. (3) Chlorophyll is essential for photosynthesis. Measuring chlorophyll-a concentration could reflect the phytoplankton biomass and water quality status. The species composition of the phytoplankton community was closely correlated with chlorophyll-a content, dynamic variation of the physical and chemical index, and comprehensive index of water body. The correlation and principal components analyses revealed significant positive correlation of chlorophyll-a concentration with temperature, total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), chemical oxygen demand (COD), and permanganate index (COD_{Mn}). Further, phosphorous might be a limiting factor, as indicated by its strong effect on phytoplankton abundance.

Key Words: Fenhe water storage area; phytoplankton; nutrients; correlation analysis; principal components analysis

浮游植物是水生态系统中的初级生产者与重要饵料生物,也是水环境中的重要指示生物。浮游植物的种类组成和数量分布的生态学特征是水生生态系统的重要研究内容,及首要和重要环节[1]。其结构简单,个体微小,对水体中各因素变化极其敏感,从而在短时间内发生一定的改变,与其他生物群落相比较,浮游植物更为及时、准确的反映水生态系统的变化[2-3]。浮游植物作为水环境特征的重要指示剂,已引起了世界范围内的研究和关注[4-5]。因此,人们可以通过测定浮游植物的数量、种类等特征,来达到分析水质状况的目的[6-7]。对此,国内外已有很多对河流、湖泊等浮游植物研究的先例,并对其水质进行了分析与研究[8-9]。

汾河是山西最大的河流,发源于宁武县东寨镇管涔山脉楼山下的水母洞,流经 6 个地市,34 个县市,在河津市汇入黄河,全长约 700km。流域面积约 40000km^2,约占全省总面积的四分之一,该流域覆盖了全省 41% 的人口,是山西人民的母亲河,也是黄河的第二大支流。汾河流域作为山西全省经济和社会发展的核心区域,由于长时间过度开发,生态环境受到极大破坏,严重制约山西经济社会的可持续发展和民众生活质量的提高,也影响了山西的对外形象。近年,汾河中下游流域内乡镇企业发展迅猛,相继建起了大批洗煤、选矿、炼焦、造纸等高污染企业,加重了对汾河水质的污染[10]。

太原汾河蓄水区北起柴村桥北侧,南至祥云桥南侧,由北向南贯穿太原市迎泽区、尖草坪区、万柏林区、晋源区、小店区,全长 6km,河宽 500m,占地 300 余 hm^2。太原汾河蓄水区为人工复式河槽,中墙将其分为东、西两渠,西侧为浑水渠,宽约 80m,用来排洪与水库灌溉;东侧为清水渠,宽约 220m,由多道橡胶坝将其分为蓄水湖面。东西两岸各有一条排污暗渠,用来接纳沿线城镇的排污管道,将污水送至下游污水处理厂净化处理。

本文系统地调查分析了太原汾河蓄水区 9 个采样点浮游植物群落组成、气温、水温、溶解氧、高锰酸盐指数、总氮、总磷等环境因子的特征,并运用 PCA 方法对浮游植物与环境因子之间的关系进行分析探讨,旨在为太原汾河蓄水区水质生态学评价和水环境监测提供理论依据,有助于建立该地区健康安全的生态环境管理机制,对太原汾河蓄水区水生生物资源的可持续发展提供重要的参考[11]。

1 材料与方法

1.1 采样点布设与采样时间

自 2015 年 6 月开始至 10 月,每月定期对太原汾河蓄水区进行采样,根据其自然情况及地理位置,从上游至下游,共布设 9 个采样点,分别为柴村桥(S1),胜利桥北(S2),胜利桥南(S3),迎泽桥(S4),南内环桥(S5),长风桥(S6),跻汾桥(S7),南中环桥南(S8)和九院沙河南侧(S9)[12](图 1)。

1.2 水样的采集与鉴定

浮游植物的水样采集包括定性采集和定量采集两种。定性采集用 25 号浮游生物网在水面以"∞"形来

回拖动,以约 20—30cm/s 的速度拖动 3min,待网内多余的水滤去,打开管底的阀门,将网头的水样收集到事先准备好的 50mL 标本瓶中,用 4% 的甲醛现场固定。定量采集用 1L 采水器采集,将采集好的液体用 15%的鲁哥氏液固定,同时每瓶贴上标签,标明时间、采样点,然后将液体摇匀后倒入 1L 的广口瓶中沉淀 24h,用虹吸管小心抽出上层不含藻体的"上清液",然后将剩下 70—80mL 的液体转移至 100mL 定量瓶中,再用少许上述虹吸管吸出来的"上清液"清洗 3 次广口瓶,冲洗液转入至 100mL 定量瓶中待检[13],用显微镜(Olympus BX51)进行鉴定与计数[14-15]。

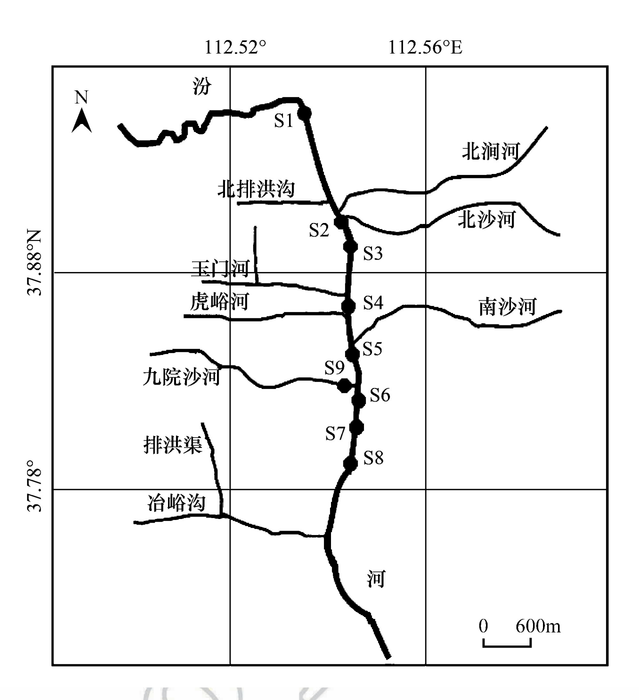


图 1　太原汾河蓄水区采样点分布

Fig.1　Distribution of sampling sites in Fenhe water storage area of Taiyuan

柴村桥(S1),胜利桥北(S2),胜利桥南(S3),迎泽桥(S4),南内环桥(S5),长风桥(S6),跻汾桥(S7),南中环桥南(S8)和九院沙河南侧(S9)

1.3　水质中各理化指标的测定

按照《地表水和污水检测技术规范(HJ/T 91—2002)》将水样进行处理、运输、保存和测定。透明度(Transparency, SD)利用透明度盘进行测定,水温、pH 值、溶解氧用多参数水质分析仪(HQ40D, Hach, Loveland, USA)测定[16],叶绿素 a(Chlorophyll-a, Chl-a)采用丙酮萃取分光光度法测定。总氮(Total nitrogen, TN)、总磷(Total phosphorus, TP)、氨氮(Ammonia nitrogen, NH_4^+-N)、化学需氧量(Chemical oxygen demand, COD)、高锰酸盐指数(Permanganate index, COD_{Mn})的测定方法和标准参考《水与废水监测分析方法》和《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)进行测定。

1.4　数据处理

1.4.1　密度的计算

水中浮游植物密度的计算,参照文献[17]。

1.4.2　综合营养状态指数

根据中国环境监测总站制定的《湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规定》,选用叶绿素 a、总磷、总氮、透明度、高锰酸盐指数 5 个参数,采用综合营养状态指数法评价太原汾河蓄水区水质综合营养状态,其公式为:

$$\mathrm{TLI}(\sum) = \sum_{j=1}^{m} W_j \cdot \mathrm{TLI}(j)$$

式中, $\mathrm{TLI}(\sum)$ 表示综合营养化状态指数; $\mathrm{TLI}(j)$ 代表第 j 中参数的营养状态指数; W_j 为第 j 种参数的营养状态指数相关权重。

以 Chl-a 作为基准参数,则第 j 种参数的归一化的相关权重计算公式为 $W_j = \dfrac{r_{ij}^2}{\sum_{j=1}^{m} r_{ij}^2}$

r_{ij} 为第 j 种参数与基准参数 Chl-a 的相关系数; m 为评价参数的个数。

中国湖泊的 Chl-a 与其他参数之间的相关关系 r_{ij} 及 r_{ij}^2 见表 1[18]。单个营养状态指数计算公式:

$$\mathrm{TLI(Chl\text{-}a)} = 10(2.5+1.086\ln\mathrm{Chl\text{-}a})$$

$$\mathrm{TLI(TP)} = 10(9.436+1.624\ln\mathrm{TP})$$

$$\mathrm{TLI(TN)} = 10(5.453+1.694\ln\mathrm{TN})$$

$$TLI(SD) = 10(5.118-1.94\ln SD)$$

$$TLI(COD_{Mn}) = 10(0.109+2.66\ln COD_{Mn})$$

综合营养状态指数为 TLI(∑),其分级标准为:TLI(∑)<30 为贫营养,30≤TLI(∑)≤50 为中营养,TLI(∑)>50 为富营养,50<TLI(∑)≤60 为轻度富营养,60<TLI(∑)≤70 为中度富营养,TLI(∑)>70 为重度富营养[19]。

表 1 中国湖泊部分参数与叶绿素 a 的相关关系 r_{ij} 及 r_{ij}^2 值

Table 1 Some parameters of Chinese reservoir with the interrelated relationship of Chl-a r_{ij} and r_{ij}^2 value

环境因子 Environmental factors		叶绿素 a Chl-a	总磷 TP	总氮 TN	透明度 SD	高锰酸盐指数 COD_{Mn}
参数 Parameter	r_{ij}	1	0.84	0.82	−0.83	0.83
	r_{ij}^2	1	0.7056		0.6889	0.6889

r_{ij}为第 j 种参数与基准参数 Chl-a 的相关系数; r_{ij}^2为第 j 种参数与基准参数 Chl-a 的相关系数的平方 Chl-a: 叶绿素 a, Chlorophyll-a; TP: 总磷, Total phosphorus; TN: 总氮, Total nitrogen; SD: 透明度, Transparency; COD_{Mn}: 高锰酸盐指数, Permanganate index

1.4.3 相关性分析

采用相关性分析来研究叶绿素 a 与环境因子的响应关系,同时建立相应的回归方程,对各项环境因子做主成分分析(PCA),筛选出对浮游植物影响较大的因子,然后利用 Origin 8.5 和 SPSS 19.0 处理以上数据,并进行分析。

2 结果与分析

2.1 优势种空间分布

对于不同采样点的调查发现,在丰水期与平水期,各个采样点的优势种有所不同,其中蓝藻门以微小色球藻(*Chroococcus minutus*)、微小平裂藻(*Merismopedia tenuissima*)、小颤藻(*Oscillatoria tenuis*)、铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)为主要优势种,绿藻门以小球藻(*Chlorella vulgaris*)为主要优势种,硅藻门以尖针杆藻(*Synedra acus*)为主要优势种(表 2)。丰水期与平水期相比较,丰水期优势种种类居多。

2.2 浮游植物丰度特征与叶绿素 a 变化

浮游植物的丰度等变化与种类的组成,与季节和水体中营养元素密切相关[20]。调查期间发现,该流域共包括 204 种,隶属 8 门 75 属。其中蓝藻门、绿藻门所占比例较大,分别为 54.89%、33.49%,合计占总种数的 93.38%,其次是硅藻门占总数的 5.15%,裸藻门、金藻门、甲藻门、隐藻门种类相对较少,仅占总数的 1.47%。以上结果显示,太原汾河蓄水区夏秋季浮游指物群落构成了以蓝-绿藻门为主要优势类群[21]。每个月的浮游植物种类稍有变动,但并不明显,表现为夏季相对于秋季蓝藻门种类居多,造成这种现象的主要原因是夏季光照强度高、水温较高、多雨,以上条件同时也是蓝藻门中的微囊藻属种类形成水华的必要条件[22]。

太原汾河蓄水区平水期(2015 年 9 月、10 月)和丰水期(2015 年 5 月、6 月、7 月 8 月)浮游植物丰度分别为 4.52—67.27×10、16.85—89.19×10^6个/L,平均值分别为 36.03×10^6、50.24×10^6个/L。平水期蓝藻在丰度上占多数,占 42.95%,丰度为 0.70—26.75×10^6个/L,平均值为 13.725×10^6个/L。其次为绿藻,占35.36%,丰度为 0.86—49.00×10^6个/L,平均值为 24.93×10^6个/L。再次为硅藻,占 17.35%,丰度为 0.62—14.62×10^6个/L,平均值为 7.62×10^6个/L;丰水期蓝藻在丰度上也占多数,原因是丰水期多雨,太原汾河蓄水区多暴发水华,占 59.24%,丰度为 0.13—48.46×10^6个/L,平均值为 24.30×10^6个/L。其次为绿藻,占 28.12%,丰度为 0.08—30.14×10^6个/L,平均值为 15.11×10^6个/L。再次为硅藻,仅占 7.36%,丰度为 0.70—10.08×10^6个/L,平均值为 5.39×10^6个/L(图 2)。

太原汾河蓄水区叶绿素 a 整体均值为 38.13mg/L,变化范围为 17.04—84.60mg/L,最大值出现在 S6(长风桥),最小值出现在 S1(柴村桥)。叶绿素 a 的含量随地理位置变化明显,中下游要显著高于上游,原因是中下

游地区营养盐浓度偏高,在一定程度上刺激了浮游植物的生长[23],导致藻类细胞密度较大,叶绿素 a 含量升高。在时间上,叶绿素 a 的含量分布特征具有相似性,主要表现为丰水期((79.56±4.36)mg/L)叶绿素 a 含量高于平水期((24.32±3.15)mg/L),原因在于丰水期降雨径流带来的营养盐以及水温的升高,为浮游植物的生长与繁殖提供了养分与适宜的温度。

表 2　各采样点在丰水期与平水期的浮游植物优势种

Table 2　Phytoplankton dominant species of each site in wet season and normal season

时间 Time	样点 Site								
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
丰水期 Wet season	两栖颤藻 (*Oscillatoria amphibia*) 小颤藻 (*O. tenuis*) 微小色球藻 (*Chroococcus minutus*) 微小平裂藻 (*Merismopedia tenuissima*) 小球藻 (*Chlorella vulgaris*) 分歧锥囊藻 (*Dinobryon divergens*)	小颤藻 (*O. tenuis*) 悦目颤藻 (*O. amoena*) 微小色球藻 (*C. minutus*) 小球藻 (*C. vulgaris*) 小球衣藻 (*Chlamydomonas microsphaera*) 实球藻 (*Pandorina morum*)	铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 微小平裂藻 (*M. tenuissima*) 水华鱼腥藻 (*Anabaena flos-aquae*) 球衣藻 (*Ch. globosa*) 尖针杆藻 (*Synedra acus*)	微小平裂藻 (*M. tenuissima*) 线形棒条藻 (*Rhabdoderma lineare*) 铜绿微囊藻 (*M. aeruginosa*) 尖针杆藻 (*S. acus*)	微小平裂藻 (*M. tenuissima*) 小球藻 (*C. vulgaris*)	微小平裂藻 (*M. tenuissima*) 中华尖头藻 (*R. sinensia*) 三角四角藻 (*Tetraedron trigonum*) 直角十字藻 (*Crucigenia rectangularis*) 尖针杆藻 (*S. acus*)	微小平裂藻 (*M. tenuissima*) 铜绿微囊藻 (*M. aeruginosa*) 小空星藻 (*Coelastrum microporum*) 尖针杆藻 (*S. acus*)	微小平裂藻 (*M. tenuissima*) 铜绿微囊藻 (*M. aeruginosa*) 微小色球藻 (*C. minutus*) 小球藻 (*C. vulgaris*)	微小平裂藻 (*M. tenuissima*) 铜绿微囊藻 (*M. aeruginosa*) 微小色球藻 (*C. minutus*) 小形色球藻 (*C. minor*)
平水期 Normal season	微小色球藻 (*C. minutus*) 小形色球藻 (*C. minor*)	小球藻 (*C. vulgaris*)	微小平裂藻 (*M. tenuissima*) 水华鱼腥藻 (*A. flos-aquae*)	微小平裂藻 (*M. tenuissima*) 为首螺旋藻 (*Spirulina princeps*) 中华尖头藻 (*Raphidiopsis sinensia*)	微小平裂藻 (*M. tenuissima*)	简单颤藻 (*O. simplicissima*) 小颤藻 (*O. tenuis*) 中华尖头藻 (*R. sinensia*)	微小平裂藻 (*M. tenuissima*) 细微颤藻 (*O. subtillissima*) 小颤藻 (*O. tenuis*)	微小色球藻 (*C. minutus*) 小球藻 (*C. vulgaris*)	微小色球藻 (*C. minutus*)

柴村桥(S1),胜利桥北(S2),胜利桥南(S3),迎泽桥(S4),南内环桥(S5),长风桥(S6),跻汾桥(S7),南中环桥南(S8)和九院沙河南侧(S9)

2.3　各采样点综合营养状态指数

调查期间,太原汾河蓄水区 9 个采样点水质均达到富营养状态(表 3),在丰水期,S1—S7 采样点水质达到轻度富营养状态,S8、S9 采样点水质达到中度富营养状态;在平水期,S1—S6 样点水质达到轻度富营养状态,S7—S9 采样点水质达到中度富营养状态。这种情况的发生,可能是由于沿途城镇居民生活污水、工业废水的不合理排放,造成水体中各项理化指标超标,使水体富营养化。由于 S7、S8、S9 站点在下游,这就更容易让该地区的水体受到污染,从而达到中度富营养状态。

表 3　各样点在丰水期与平水期的综合营养状态指数

Table 3　Comprehensive nutritive index of each site in wet season and normal season

时间 Time	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
丰水期 Wet season	56.64±2.43	57.42±3.48	59.22±5.38	56.93±5.89	58.32±6.06	53.59±4.53	59.46±7.66	64.08±9.63	60.03±4.24
平水期 Normal season	55.96±1.22	56.44±2.13	58.91±1.66	56.04±5.01	58.87±1.15	55.64±2.39	63.16±0.65	66.99±3.14	60.2±2.65

2.4　叶绿素 a 含量与水环境及营养元素的相关性分析

太原汾河蓄水区各采样点环境因子参数如表 4 所示。根据叶绿素 a 与水环境因子进行相关性分析(表 5),同时建立回归方程(图 3)。结果显示,太原汾河蓄水区叶绿素 a 与 TN 呈显著正相关($r=0.12$, $P<0.05$),

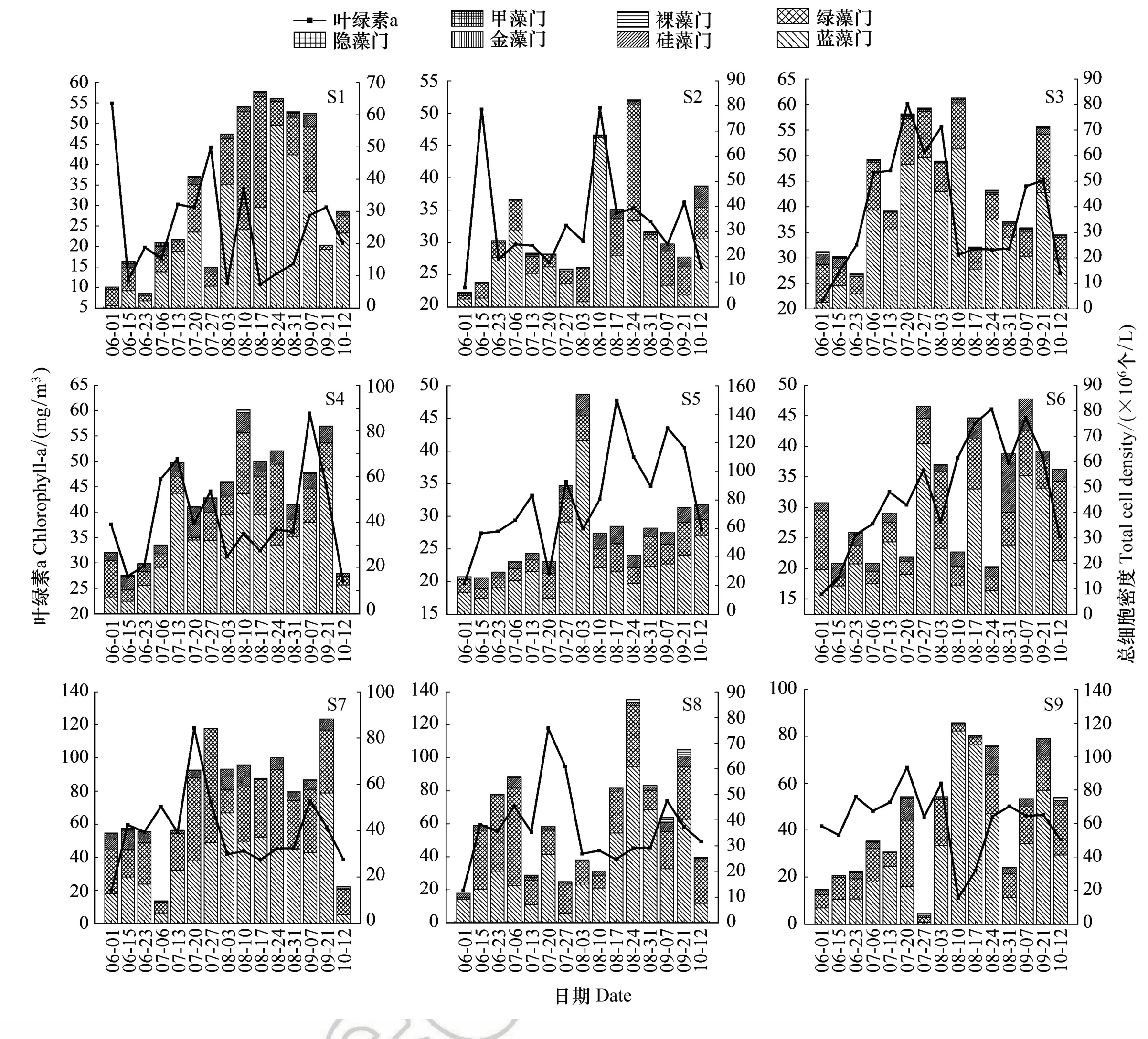


图 2 太原汾河蓄水区各样点叶绿素 a 与总细胞密度变化

Fig.2 Chl-a and total cell density change trend in Fenhe water storage area of Taiyuan

S:代表样点 Site

与 TP 呈显著正相关($r=0.12, P<0.05$),说明总氮、总磷对太原汾河蓄水区浮游植物生长有重要的影响,而总磷对浮游指物的影响更加显著。水体中总氮、总磷等无机营养盐是影响浮游植物光合作用的重要因子[24]。此外,当水体中的氮磷比大于 20 时,磷可能会成为水体营养水平的限制因子[25]。太原汾河蓄水区氮磷比丰水期为 24.91,平水期为 28.27,由此可以说明磷是太原汾河蓄水区浮游植物生长的限制因子。

太原汾河蓄水区叶绿素 a 与水温呈显著正相关($r=0.12, P<0.05$),随水温上升的同时,浮游植物的生长速度也随之加快。说明水温是影响藻类光合作用和呼吸代谢的重要因素,适宜的水温可以加快藻细胞内的新陈代谢作用,从而促进了浮游植物的生长与繁殖[26]。与此同时,太原汾河蓄水区叶绿素 a 与 COD 呈极显著正相关($r=0.58, P<0.01$),与 COD_{Mn} 呈极显著正相关($r=0.42, P<0.01$)。水中的有机物会促进藻类的生长,太原汾河蓄水区的有机物主要来自沿途生活污水的排放、农业水产养殖等,这些有机物通过氧化分解,最终变成了可供藻类直接利用的营养物质(图 3)。

2.5 叶绿素 a 含量与水环境及营养元素的主成分分析

主成分分析旨在利用降维的思想,把多指标转化为少数几个综合指标。9 个样点的水环境及营养元素的主成分分析结果见表 6。主成分数目选定既要满足数据降维目的又希望综合尽可能多的信息,常用累计方差

贡献率不低于某一阈值来确定主成分数目。第一主成分可以最大限度反映样本之间的差别[27]。

表 4　各采样点在丰水期与平水期的水环境及营养元素

Table 4　The environment and nutrient elements of each site in wet season and normal season

时间 Time	采样点 Sampling	水温 WT/℃	气温 AT/℃	pH	溶解氧 DO/(mg/L)	高锰酸盐指数 COD_{Mn}/(mg/L)	化学需氧量 COD/(mg/L)	总氮 TN/(mg/L)	氨氮 NH_4^+-N/(mg/L)	叶绿素 a Chl-a/(mg/L)	总磷 TP/(mg/L)	透明度 SD
丰水期	S1	24.35	23.53	8.32	5.74	6.10	21.80	1.63	0.71	30.28	0.06	/
Wet season	S2	25.05	23.80	8.37	5.51	5.18	21.10	1.52	0.22	29.68	0.07	0.60
	S3	25.00	23.63	8.37	5.18	6.51	30.03	1.38	0.41	51.13	0.06	0.43
	S4	25.58	23.80	8.34	5.46	5.58	24.95	1.43	0.35	44.70	0.07	0.45
	S5	25.45	23.88	8.28	5.28	5.61	20.98	1.50	0.39	29.78	0.07	0.48
	S6	25.50	24.40	8.27	5.29	4.98	13.43	1.19	0.32	31.58	0.04	0.69
	S7	25.90	24.63	8.31	5.80	5.93	32.20	1.54	0.43	68.10	0.06	0.46
	S8	26.33	25.13	8.28	5.50	8.73	36.10	3.35	1.80	84.60	0.11	0.48
	S9	25.85	25.93	8.30	5.72	6.36	27.78	2.95	0.54	53.18	0.12	0.59
平水期	S1	19.90	17.80	8.20	6.79	5.08	12.30	1.64	0.36	29.60	0.04	/
Normal season	S2	20.20	18.20	8.58	6.59	6.66	17.90	1.74	0.21	36.20	0.05	0.60
	S3	20.60	18.40	8.53	5.23	7.06	23.80	1.10	0.33	45.20	0.09	0.40
	S4	21.00	18.50	8.56	5.76	6.61	20.10	1.14	0.28	45.10	0.07	0.40
	S5	20.90	19.00	8.54	4.22	6.01	15.20	1.24	0.32	40.50	0.08	0.50
	S6	21.00	19.40	8.28	3.50	4.74	11.40	1.03	0.24	38.30	0.03	0.70
	S7	21.90	19.60	8.29	4.36	8.90	33.10	1.95	0.30	54.60	0.13	0.50
	S8	21.90	19.80	8.44	5.80	9.63	41.30	2.86	2.05	58.20	0.19	0.40
	S9	21.40	20.20	7.97	6.83	6.70	20.00	1.81	0.62	46.50	0.08	0.50

WT: 水温, Water temperature; AT: 气温, Air temperature; DO: 溶解氧, Dissolved oxygen; COD_{Mn}: 高锰酸盐指数, Permanganate index; COD: 化学需氧量, Chemical oxygen demand; TN: 总氮, Total nitrogen; NH_4^+-N: 氨氮, Ammonia nitrogen; Chl-a: 叶绿素 a, Chlorophyll-a; TP: 总磷, Total phosphorus; SD: 透明度, Transparency

表 5　叶绿素 a 与水环境及营养元素的相关性

Table 5　The correlation of Chl-a and environment, and nutrient elements

环境因子 Environmental factors	水温 WT	气温 AT	pH	溶解氧 DO	高锰酸盐指数 COD_{Mn}	化学需氧量 COD	总氮 TN	氨氮 NH_4^+-N	总磷 TP	透明度 SD
相关性 Correlation	0.741*	0.588	−0.148	0.265	0.821**	0.906**	0.680*	0.310	0.717*	0.087
显著性 Significance	0.022	0.096	0.704	0.491	0.007	0.001	0.044	0.417	0.030	0.824
数据量 Number	126	126	126	126	126	126	126	126	126	126

* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关; ** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关

主成分的载荷矩阵在旋转之后的载荷系数更接近 1 或者更接近 0,得到的主成分能够更好地解释和命名变量(表 7)。决定第一主成分的主要是水温、气温、溶解氧、叶绿素 a 等理化指标,第一主成分反映原始数据信息量的 59.182%,为与浮游植物出现数量相关的因子。决定第二主成分大小的主要是总氮、氨氮等,其贡献率为 75.762%,为氮源因子。决定第三主成分的是透明度,其负荷值为负值,其贡献率为 87.489%,称其为透明度因子。由图 4 能够直观的看出各个站点与 PC_1 和 PC_2 的关系:S5,S7,S8 和 S9 依次落在 PC_1 与 PC_2 的正向区间,表明这 4 个站点水温、气温较高,溶解氧与其成反比,含量较低,总氮、氨氮、叶绿素 a 含量较高,说明藻细胞密度较大。S1 落在第二区间,水温、气温较低,溶解氧含量较高,总氮、氨氮、叶绿素 a 含量较低,说明藻细胞密度较小。S2 和 S3 分布在第三区间,该区间水温、气温较低,溶解氧含量高,藻细胞密度较小。S4 和 S6 分布在第四区间,该区间气温、水温较高,溶解氧含量较高,总氮、氨氮、叶绿素 a 含量较低,藻细胞密度相对

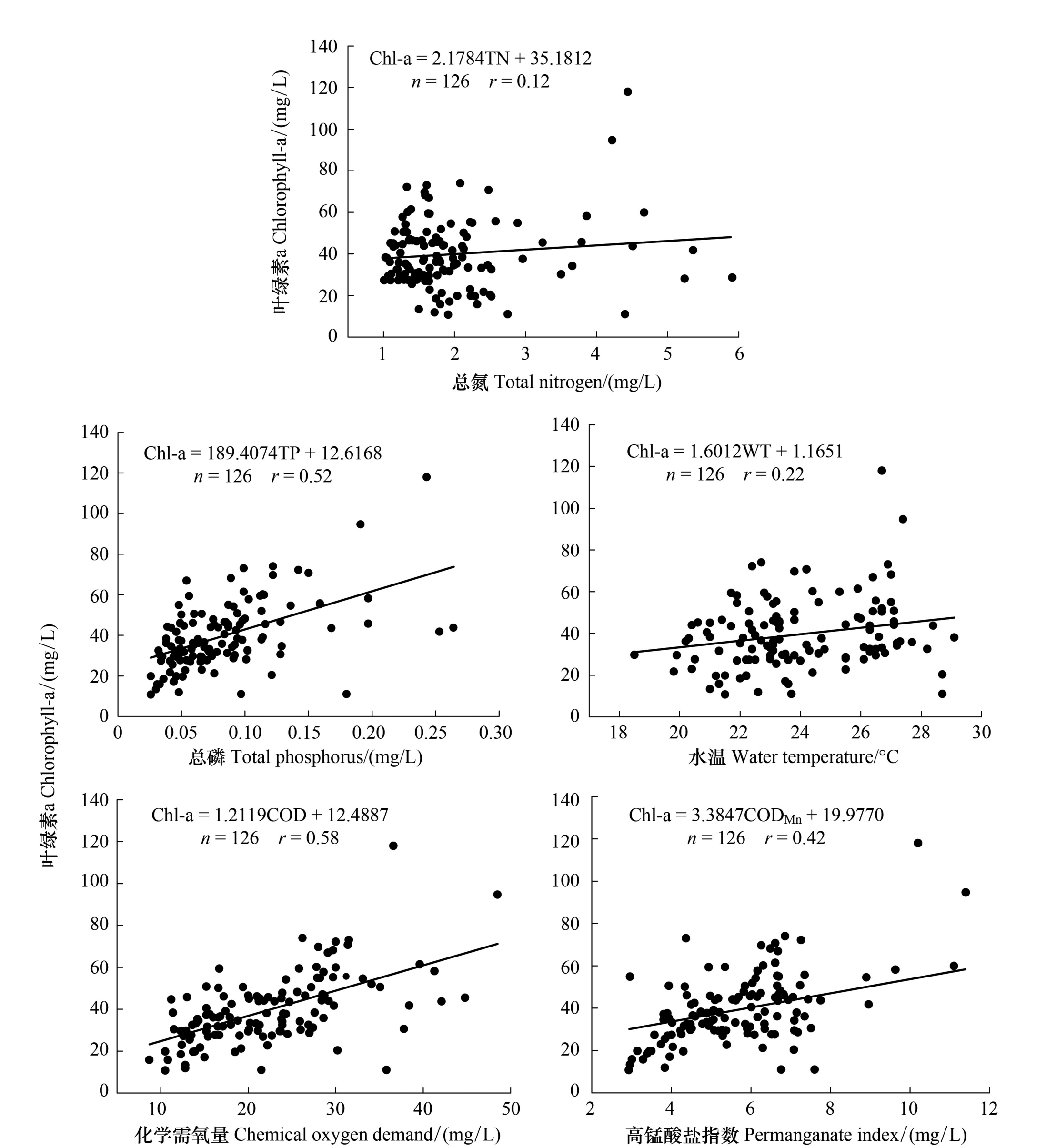


图 3　叶绿素 a 与总氮、总磷、水温、化学需氧量和高锰酸盐指数的相互关系

Fig.3　The correlations between Chl-a and TN, TP, WT, COD, COD_{Mn}

Chl-a：叶绿素 a，Chlorophyll-a；TN：总氮，Total nitrogen；TP：总磷，Total phosphorus；WT：水温，Water temperature；COD：化学需氧量，Chemical oxygen demand；COD_{Mn}：高锰酸盐指数，Permanganate index

较大。

由图 4 可知各个站点 PC_2与 PC_3的关系：S5 和 S8 落在第一区间，表明总氮、氨氮含量较高的同时，其透明度较低，藻细胞密度较高。S6 落在第三区间，总氮、氨氮含量较低，其透明度较高，藻细胞密度较高。S4 落在第二区间下侧，总氮、氨氮含量较高，透明度较低，藻细胞密度较大；S2 和 S3 落在第二区间右侧，总氮、氨氮含量较低，透明度较高，藻细胞密度较小。S1 落在第四区间左侧，总氮、氨氮含量较高，超出了标准值，透明度较高，藻细胞密度较低。

PCA 分析结果表明，太原汾河蓄水区营养盐、有机物含量、水温等都是影响太原汾河蓄水区浮游植物生长的重要因素，这对分析太原汾河蓄水区水环境营养元素控制因子以及浮游植物的生长影响因素有重要的作用。

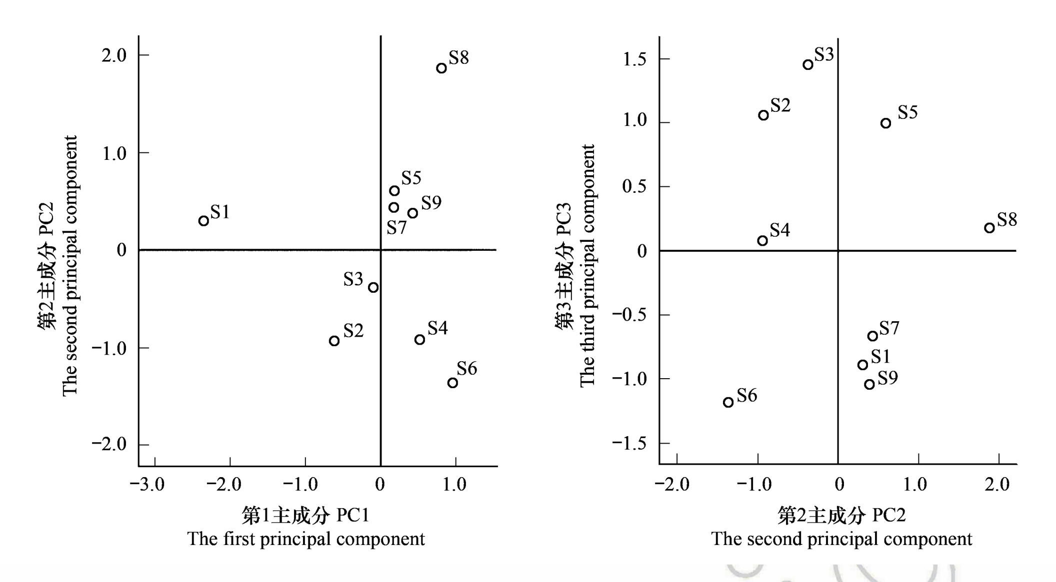


图 4　太原汾河蓄水区 9 个采样点主成分分析得分图

Fig.4　PCA scores of 9 sample stations in Fenhe water storage area

表 6　水环境及营养元素的主成分分析

Table 6　The principal component analysis (PCA) of environment and nutrition elements

主成分数 Component number	初始特征值 Intitial eigen values		
	总值 Total	方差 Variance/%	累计贡献率 Cumulative/%
1	7.694	18.364	59.182
2	2.155	16.580	75.762
3	1.524	11.726	87.489

表 7　主成分分析旋转后的成分载荷矩阵

Table 7　Rotated component matrix of PCA (principal component analysis)

环境因子 Environmental factors	主成分 Component		
	PC_1	PC_2	PC_3
水温 Water temperature	0.928	0.212	−0.270
气温 Air temperature	0.871	0.344	−0.294
pH	−0.235	−0.605	0.583
溶解氧 Dissolved oxygen	−0.828	−0.455	−0.024
高锰酸盐指数 Permanganate index	0.577	0.695	0.012
化学需氧量 Chemical oxygen demand	0.549	0.745	0.148
总氮 Total nitrogen	−0.133	0.945	−0.022
氨氮 Ammonia nitrogen	0.177	0.917	−0.103
叶绿素 a Chlorophyll-a	0.899	0.076	0.282
总磷 Total phosphorus	0.402	0.811	0.362
透明度 Transparency	−0.196	−0.121	−0.765

旋转在 4 次迭代后收敛;PC_1—PC_3 分别表示第一至第三主成分

3　讨论

一般条件下,丰水期气温、水温较高,水体中营养盐等各成分含量多,更新快,适宜藻类生长繁殖,平水期则稍逊之。虽然蓝藻门、绿藻门、硅藻门种类较多,但各采样点藻类植物的种类略有不同。通过对太原汾河蓄水区丰水期与平水期各采样点优势种的调查发现,S5 采样点处于太原汾河蓄水区中段,周边工厂、居民住宅居多,工业废水生活污水的不合理排放,导致该河段水体中藻的种类较少,只有微小平裂藻(*M. tenuissima*)和

小球藻(*C. vulgaris*)。但总体来说,该流域蓝藻门、绿藻门占绝大多数,丰水期以蓝藻门中的微小色球藻(*C. minutus*)、微小平裂藻(*M. tenuissima*)、小颤藻(*O. tenuis*)为主要优势种,下游出现铜绿微囊藻(*M. aeruginosa*),说明该流域容易暴发水华等危害。同时绿藻门以小球藻(*C. vulgaris*)为主要优势种。硅藻门相对较少,主要优势种为尖针杆藻(*S. acus*)。相对于平水期而言,优势种种类较少,蓝藻门的微小平裂藻(*M. tenuissima*)、绿藻门的小球藻(*C. vulgaris*)依然是该时期的主要优势种。

水体富营养化是指河流或湖泊在自然因素或人类活动影响下,造成水体生产力从低的贫营养状态逐步向生产力高的富营养状态过度的一种现象。如今已成为水体污染最严重的问题之一,也是全球性环境问题之一。太原汾河蓄水区由北向南贯穿整个太原市,近年来,随着社会经济的迅速发展,人口与工业企业的增加以及城镇规模化扩张多个检测站点靠近市中心,由于附近居民、游客的不良习惯,造成生活垃圾、污水不合理排放,沿途的各大工厂对工业废水没有严格把控,使其汇入汾河,致使总氮、总磷等指标偏高,蓝藻细胞密度增大,水体富营养化程度加重[28],最终导致整个水体处于轻度富营养状态或中度富营养状态,造成了生态环境的破坏。因此太原汾河蓄水区污染防治措施要以入河污染物总量控制为原则,拟定具有针对性的分阶段投资行动方案。以点源污染控制为主,工厂实行达标排放和清洁生产,强化城镇生活污染处理工程建设与技术革新。水体环境因子及营养元素是影响水体生态系统的重要因素,决定着不同的浮游植物群落结构,并且环境因子及营养元素也是评价水质和水体营养状态的重要指标[29]。水温、气温的变化对浮游植物的生物量有着明显的影响[30],温度的改变直接影响着河流中的物理和化学活动,从而影响水体上下水层的交换、各营养物质的循环与分布[31-32]。太原汾河蓄水区夏季水温较高,各种营养物质循环速度变快,营养物的摄入量大大增加,致使该流域浮游植物密度增大,秋季以后,气温下降,导致水温较低,营养物的摄入量减少,浮游植物密度降低。

叶绿素是植物光合作用中重要的光合色素。通过测定叶绿素 a 浓度大小,可间接反映出水体中浮游植物生物量及水质状况[33-35],而且浮游植物的生物量与种类也与其密切相关,是水体理化指标动态变化的综合指标[31,36]。叶绿素 a 的含量也受到水温、气温、氮、磷、透明度、营养盐等因素的影响。本研究结果显示叶绿素 a 与总磷、总氮相关性显著,太原汾河蓄水区各站点叶绿素 a 含量与浮游植物密度的变化趋势一致,并且呈显著或极显著正相关。

氮、磷是藻类生长的重要营养因子,在一定浓度范围内对浮游植物的生长有促进作用,反之,也会有抑制作用[37]。水体中过高的氮、磷含量易使浮游植物群落单一化,同时易爆发大量的藻类[38]。太原汾河蓄水区各采样点叶绿素 a 与总氮、总磷呈显著正相关。水体中的氮磷比在一定程度上可反映出营养盐对浮游植物生长的影响,进而影响水体中叶绿素 a 的含量。当氮磷比大于 20:1 时,说明氮过量,磷是限制因子,藻细胞密度主要受磷含量的影响;当氮磷比小于 13:1 时,说明氮不足,氮是限制因子[39]。太原汾河蓄水区的氮磷比总体均值在丰水期和平水期分别为 24.91 和 28.27,并且总氮均存在超标现象,由此可以说明磷是该流域藻类生长的主要限制因子[40]。

化学需氧量,高锰酸盐指数是监测水环境中有机物含量的两个重要指标,二者在理论上存在着定性的大小关系,指数越大,水体受有机物污染越严重。化学需氧量是指,处理水样时,以重铬酸钾作为氧化剂,在一定条件下其所消耗的量,高锰酸盐指数是指,以高锰酸钾作为氧化剂,在一定条件下其所消耗的量[41]。二者都是利用化学物质氧化有机物,化学需氧量的测定时间短(2—3h),不受水质成分的限制[42]。高锰酸盐指数测定时间最短,但是由于高锰酸钾的氧化能力弱于重铬酸钾,只能氧化一部分有机物。本次叶绿素 a 与化学需氧量、高锰酸氧指数相关性分析结果显示,均为极显著正相关,二者相关系数差异较小,说明水体中有的机物会促进藻类的生长繁殖,同时藻类自身会通过光合作用产生大量有机物,使水体中化学需氧量与高锰酸盐指数升高。

主成分分析是一个采用较少的综合指标代替原来多个指标的大部分信息的一种降维的分析方法,剔除不重要的信息,保留所需要的重要信息。本研究据此对太原汾河蓄水区的 9 个采样点的 13 项指标进行主成分

分析提取更为重要有用的信息,并采用主成分得分图分析各个主成分和理化指标与站点之间的关系,对评价各样点理化指标之间关系提供更为直观有效的理论依据。若选择浮游植物较多的采样点,可在 PC_1 和 PC_2 得分图的第一区间与 PC_2 和 PC_3 得分图的第二、三区间选择,说明该采样点附近污染较严重,水体中氮、磷含量较高,严重的水体富营养化会导致水华的爆发。

参考文献(References):

[1] 徐祖信. 河流污染治理规划理论与实践. 北京: 中国环境科学出版社, 2003.

[2] Pérez J R, Loureiro S, Menezes S, Palma P, Fernandes R M, Barbosa I R, Soares A M V M. Assessment of water quality in the Alqueva Reservoir (Portugal) using bioassays. Environmental Science and Pollution Research, 2010, 17(3): 688-702.

[3] 鞠永富, 于洪贤, 于婷, 柴方营, 姚允龙, 张延成, 费滕, 夏凌云. 西泉眼水库夏季浮游动物群落结构特征及水质评价. 生态学报, 2016, 36(16): 5126-5132.

[4] Beisner B E, Longhi M L. Spatial overlap in lake phytoplankton: relations with environmental factors and consequences for diversity. Limnology and Oceanography, 2013, 58(4): 1419-1430.

[5] Longhi M L, Beisner B E. Environmental factors controlling the vertical distribution of phytoplankton in lakes. Journal of Plankton Research, 2009, 31(10): 1195-1207.

[6] Yang Y S, Wang L. A review of modelling tools for implementation of the EU water framework directive in handling diffuse water pollution. Water Resources Management, 2010, 24(9): 1819-1843.

[7] 况琪军, 马沛明, 胡征宇, 周广杰. 湖泊富营养化的藻类生物学评价与治理研究进展. 安全与环境学报, 2005, 5(2): 87-91.

[8] 张永生, 郑丙辉, 姜霞, 郑浩, 钟娜, 陈春霄. 三峡库区大宁河藻细胞昼夜垂直迁移研究. 环境科学, 2012, 33(11): 3787-3796.

[9] 张永生, 郑丙辉, 王坤, 姜霞, 郑浩. 三峡库区大宁河枯水期藻细胞的时空分布. 环境科学, 2013, 34(6): 2166-2175.

[10] 王爱爱, 冯佳, 谢树莲. 汾河中下游浮游藻类群落特征及水质分析. 环境科学, 2014, 35(3): 915-923.

[11] 柴毅, 彭婷, 郭坤, 何勇凤, 杨德国, 罗静波. 2012 年夏季长湖浮游植物群落特征及其与环境因子的关系. 植物生态学报, 2014, 38(8): 857-867.

[12] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991.

[13] Haande S, Rohrlack T, Semyalo R P, Brettum P, Edvardsen B, Lyche-Solheim A, Sørensen K, Larsson P. Phytoplankton dynamics and cyanobacterial dominance in Murchison Bay of Lake Victoria (Uganda) in relation to environmental conditions. Limnologica-Ecology and Management of Inland Waters, 2011, 41(1): 20-29.

[14] 中国科学院中国孢子植物志编辑委员会. 中国淡水藻志(第一至第十五卷). 北京: 科学出版社, 1988-2012.

[15] 时红, 孙新忠, 范建华. 水质分析方法与技术. 北京: 地震出版社, 2001.

[16] 李艳利, 李艳粉, 徐宗学. 影响浑太河流域大型底栖动物群落结构的环境因子分析. 环境科学, 2015, 36(1): 94-106.

[17] 周群英, 高廷耀. 环境工程微生物学(第二版). 北京: 高等教育出版社, 2000.

[18] 金相灿. 中国湖泊环境. 北京: 海洋出版社, 1995.

[19] 陈建良, 胡明明, 周怀东, 王雨春, 王英才, 李艳晖, 刘永定, 高继军, 洪宇宁. 洱海蓝藻水华暴发期浮游植物群落变化及影响因素. 水生生物学报, 2015, 39(1): 24-28.

[20] 胡俊, 杨玉霞, 池仕运, 沈强, 胡菊香. 邙山提灌站浮游植物群落结构空间变化对环境因子的响应. 生态学报, 2017, 37(3): 1054-1062.

[21] 洪松, 陈静生. 中国河流水生生物群落结构特征探讨. 水生生物学报, 2002, 26(3): 295-305.

[22] 徐春燕, 杨洁, 马明睿, 胡雪芹, 由文辉. 淀山湖水华高发期浮游植物群落变化特征研究. 环境科学, 2012, 33(4): 1136-1143.

[23] 田时弥, 杨扬, 乔永民, 何文祥, 林剑华, 王栋宇. 珠江流域东江干流浮游植物叶绿素 a 时空分布及与环境因子的关系. 湖泊科学, 2015, 27(1): 31-37.

[24] 胡韧, 林秋奇, 段舜山, 韩博平. 热带亚热带水库浮游植物叶绿素 a 与磷分布的特征. 生态科学, 2002, 21(4): 310-315.

[25] Koerselman W, Meuleman A F. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation. Journal of Applied Ecology, 1996, 33(6): 1441-1450.

[26] 黄国佳, 李秋华, 陈椽, 商立海, 张垒, 欧滕, 高廷进, 李钥, 邓龙. 贵州高原红枫湖水库浮游植物功能分组及其时空分布特征. 生态学报, 2015, 35(17): 5573-5584.

[27] 张文彤. SPSS 统计分析高级教程. 北京: 高等教育出版社, 2004.

[28] 王捷, 冯佳, 谢树莲, 张建民, 程革, 连耀俊. 汾河太原河段浮游植物多样性及微囊藻产异味物质成因. 生态学报, 2015, 35(10): 3357-3363.

[29] 易齐涛, 陈求稳, 赵德慧, 徐鑫. 淮南采煤塌陷湖泊浮游植物功能群的季节演替及其驱动因子. 生态学报, 2016, 36(15): 4843-4854.

[30] Temponeras M, Kristiansen J, Moustaka-Gouni M. Seasonal variation in phytoplankton composition and physical-chemical features of the shallow Lake Doïrani, Macedonia, Greece. Hydrobiologia, 2000, 424(1/3): 109-122.

[31] 邱小琮, 赵红雪, 孙晓雪. 宁夏沙湖浮游植物与水环境因子关系的研究. 环境科学, 2012, 33(7): 2265-2271.

[32] 卢亚芳, 黄永春, 黄世玉, 周立红, 陈国斌. 厦门杏林湾水库浮游植物密度与生态因子的灰关联分析. 台湾海峡, 2002, 21(2): 209-216.

[33] 翁笑艳. 山仔水库叶绿素 a 与环境因子的相关分析及富营养化评价. 干旱环境监测, 2006, 20(2): 73-78.

[34] 谢允田, 魏民, 吕军, 王宏. 南湖叶绿素 a 含量与湖水理化性质的多元分析. 东北水利水电, 1999, (1): 43-45.

[35] 吕唤春, 王飞儿, 陈英旭, 虞左明, 方志发, 周根娣. 千岛湖水体叶绿素 a 与相关环境因子的多元分析. 应用生态学报, 2003, 14(8): 1347-1350.

[36] 刘东艳, 孙军, 钱树本. 胶州湾浮游植物研究Ⅱ环境因子对浮游植物群落结构变化的影响. 青岛海洋大学学报, 2002, 32(3): 415-421.

[37] 曲克明, 陈碧鹃, 袁有宪, 辛福言. 氮磷营养盐影响海水浮游硅藻种群组成的初步研究. 应用生态学报, 2000, 11(3): 445-448.

[38] 山鹰, 张玮, 李典宝, 王丽卿. 上海市不同区县中小河道氮磷污染特征. 生态学报, 2015, 35(15): 5239-5247.

[39] 吕虹瑞, 吕俊平, 刘琪, 谢树莲, 冯佳, 程革, 张建民. 太原汾河蓄水区 2014 年丰水期叶绿素的时空变化及环境因子相关性分析. 水生生物学报, 2016, 40(6): 1278-1286.

[40] 吴述园, 葛继稳, 苗文杰, 程腊梅, 冉桂花, 曹华芬. 三峡库区古夫河着生藻类叶绿素 a 的时空分布特征及其影响因素. 生态学报, 2013, 33(21): 7023-7034.

[41] 王冰, 李利娟, 程伟娜, 吴冬玲. 地表水中高锰酸盐指数、生化需氧量和化学需氧量的相关性分析研究. 环境科学与管理, 2016, 41(4): 134-136, 147-147.

[42] 李志亮, 仲跻文. 生化需氧量、化学需氧量、高锰酸盐指数三者关系简析. 水利技术监督, 2015, 23(1): 5-6.

